

600 MW 超临界汽轮机缸体铸造工艺与材料制备

朱晓龙¹, 王文焱¹, 谢敬佩¹, 王争辉², 刁晓刚³, 张飞扬¹

(1. 河南科技大学材料与工程学院, 河南洛阳 471023; 2. 洛阳北重工程机械有限公司, 河南洛阳 471100; 3. 中信重工洛阳重铸铁业有限责任公司, 河南洛阳 471632)

摘要: 汽轮机缸体结构复杂, 采用传统工艺容易形成缩松、裂纹等铸造缺陷。本研究采用MAGMA数值模拟软件, 优化了补缩系统和浇注系统, 得到了质量可靠、工艺出品率高的工艺方案。9Cr钢是600 MW超临界汽轮机缸体最常用的耐热材料, 通过鼓风机风冷的方法, 获得了均匀、稳定的组织, 研究了不同高温下的拉伸性能, 得到了拉伸性能随温度升高而降低的变化规律。通过冲击试验, 得到了 $FATT_{50}$ 为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的结论。采用扫描电镜分析其显微组织, 发现组织均匀, 避免了力学性能不稳定现象。

关键词: 汽轮机; 缸体; 铸造; 高温性能; ZG12Cr9Mo1VNbN; 耐热钢

汽轮机是一种将高温高压蒸汽的热能转换为机械功的旋转式动力机械^[1], 应用广泛, 特别是火力发电厂。垃圾焚烧发电厂主要由垃圾焚烧炉、余热锅炉、汽轮机、发电机等主要设备组成^[2]。汽轮机还可以作为舰船动力, 是船舶动力装置的组成部分^[3], 例如我国的辽宁舰就是以蒸汽轮机作为动力。在工业领域, 汽轮机可以驱动工厂的工业设备, 如压缩机、水泵等。

汽轮机的种类也很多。如按用途分电站汽轮机、船用汽轮机; 按热力性质分凝汽式、供热式^[4]。根据温度和压力大小可分为超超临界汽轮机、超临界汽轮机、亚临界汽轮机、超高压汽轮机等, 具体见表1。

表1 汽轮机的分类
Tab. 1 Classification of steam turbines

工作原理	热力特征	进汽压力	用途	冷却方式	燃料方式
	凝汽式				
冲动式	抽汽凝汽式	超超临界	电站用	水冷	火电
反动式	背压式	超临界	工业用	空冷	核电
组合式	抽汽背压式	亚临界	船用		
	中间再热式	超高压等			

超临界机组和超超临界机组中, “临界”指的是锅炉内工质的压力超过了临界点。锅炉内的工质是水, 水的临界状态是 $22.115\text{ MPa}/374.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在这个压力和温度下, 水和蒸汽的密度是相同的, 就叫做水的临界点。炉内工质压力低于这个压力就叫亚临界锅炉, 大于这个压力就是超临界锅炉, 炉内蒸汽温度不低于 $593\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或蒸汽压力不低于 31 MPa 被称为超超临界锅炉。

汽缸是汽轮机的外壳, 其作用是将汽轮机的通流部分与大气隔开, 形成封闭的汽室, 保证蒸汽在汽轮机内部完成能量的转换过程。在运行中, 需要承受高温、高压、高转速的苛刻环境。受力比较复杂, 有内外壁的压力差、内部各种零件的静载荷、蒸汽流出的反作用力、管道引起的应力、温度变化引起的热应力等。这些特性

作者简介:

朱晓龙(1987-), 男, 中级职称, 硕士生, 所学专业为材料与化工。电话: 15837916033, E-mail: zhuxiaolong@lbzg.com

中图分类号: TG24

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

01-0082-09

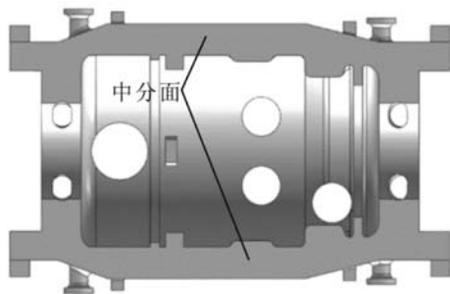
收稿日期:

2023-12-18 收到初稿,

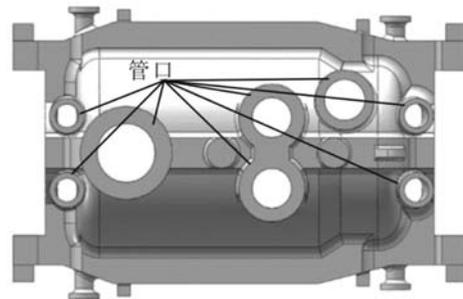
2024-01-31 收到修订稿。

要求汽轮机缸体铸件必须具有高质量、高安全性、高精度的特点。

在实际生产中，很多企业生产的铸件会出现因铸造工艺不当而引起的毛坯尺寸超差、内部存在大量缩孔、圆角过渡处热裂纹等缺陷，还有一些因材料制备引起的大量析出性气孔、高温性能不稳定现象，使铸件难以达到质量要求。本研究采用MGAMA数值模拟软件优化了补缩系统和浇注系统，提供了一种可靠的铸造工艺方法。通过合理的成分设计和热处理方法，



(a) 俯视图



(b) 仰视图

图1 汽轮机缸体的结构

Fig. 1 The structure of the cylinder block

中分面由于需要密封，一般有大量高温螺栓把合，一般设计得比较厚大，与基体相接，造成了铸件壁厚悬殊较大。法兰厚度为400 mm或更多，而主体壁厚仅仅为70 mm左右，壁厚差可达6倍以上。在铸件凝固的时候，基体很快凝固，而中分面凝固较晚，在凝固后期，极易产生热应力，进而导致热裂纹的产生。

另外，还有大量进出气体管道与基体相连，相连后在圆角处形成很多分散的小热节，难以实现顺序凝固，形成缩松。并且管道由于需要焊接，质量要求特别是坡口处，还需要射线探伤，对工艺提出了很高的要求。

最难的是部分型腔结构为异形，且较为狭窄，对模具制作、造型过程、清砂、打磨、焊补和探伤等工序影响较大，是缸体铸造的重点。这部分的尺寸一旦出现问题，往往难以修复，直接导致报废，需要引起足够的重视。

1.2 材料特点

汽轮机缸体的材料为耐热钢（表2），有低碳、

制备了ZG12Cr9Mo1VNbN材料，验证了材料的高温性能，为我国的汽轮机缸体生产提供了重要参考依据。

1 产品特点

1.1 结构特点

汽轮机缸体结构复杂，基体为半圆形，U形结构（图1），此类结构属于易变形结构，由于内腔受到机械阻碍的应力影响，收缩率往往会小于其他地方，在工艺上应重点考虑。

合金含量高、氮氢氧控制严、低夹杂等特点，其中合金方面，含有大量的Cr元素，以获得足够的高温强度和耐蚀性。Cr能同时促进 δ -铁素体和Z相形成，所以Cr含量需要被控制^[5-6]。Mo元素为重要的固溶强化和析出强化元素，同时Mo也是Laves相的重要组成元素，Laves相容易粗化，早期是材料中的强化相，但是长期来看，它的粗化会降低材料蠕变强度^[7]。W促进铁素体的作用不如Mo强烈，但值得注意的是含有大量W的耐热钢（P92）在长时间使用过程中会发生脆化^[8]。Co可以有效扩大奥氏体相区、抑制 δ 铁素体元素。在居里温度以下Co可以提高合金组织的稳定性。但Co可能降低Mo、W的固溶极限，导致Laves相提前析出^[9]。微量B能显著提高蠕变性能，提高晶界结合力，阻碍晶界碳化物粗化，有效改善合金焊接性能，是高温下比Mo更有效地提高蠕变断裂强度的元素^[10]。

目前材料方面，存在力学性能不稳定、高温性能试验成本高、化学成分控制难和易出现铸造缺陷等实际问题。

表2 ZG12Cr9Mo1VNbN耐热钢成分
Tab. 2 ZG12Cr9Mo1VNb heat-resistant steel composition

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Nb	N	Ni	Al
0.10	≤	≤	≤	≤	8.00	0.90	0.15	0.04	0.03	0.40	≤
0.16	0.60	0.90	0.025	0.015	10.0	1.10	0.25	0.09	0.06	0.60	0.020

1.3 质量要求

在无损伤探伤方面，除了管口处RT射线探伤外，加工面需要满足UT探伤二级要求，一些重要的加工面，如中分面，则要求探伤一级，其余非加工面满足探伤三级要求。目前三大汽轮机厂家哈汽、上汽、东汽，都已经形成了自己的一系列内部探伤标准。

2 铸造工艺性分析

2.1 铸造热节和分体模数计算

缸体铸件分型面一般选择中分面水平，也可以垂直90°竖立生产，本研究采用中分面向上的工艺方法。在铸造工艺设计前，先进行铸件凝固过程数值模拟，计算铸件分体模数，确定铸件热节大小与分布情况。

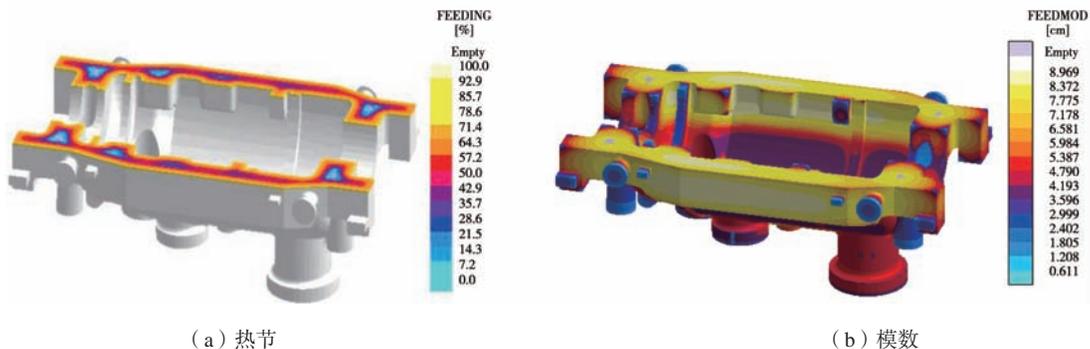


图2 缸体铸件热节和模数分析

Fig. 2 Analysis of hot spot and modulus for the cylinder block casting

2.3 铸件设计

铸件收缩率可按1.8%设计，但在长度、高度和宽度方向，收缩率有所不同，特别是宽度方向，尽管有110 mm × 110 mm拉筋，稳定铸件内腔尺寸，保证合缸后错边量符合要求，但仍有胀箱风险，考虑到修改收缩率会造成模具修改风险，单边增加了5~8 mm补正量。除中分面加工量兼顾集渣作用外，其余不建议设计过多加工量。根据标准确定的机械加工余量一般略大，在造型方法不太难情况下，可减少3~5 mm。注意铸件图纸标注尺寸公差的地方，考虑外缸产品较大，尺寸公差一般难以保证，需要刀具检查（刀具检查是指铸件不需要加工的部位，工艺人员为了使该部位不影响装配使用，通过机加工的方法，把该部位多余的部分加工掉），应设计足够打磨量，防止尺寸超差时难以焊补修复。

加工面的背面，一般加工后容易壁薄，根据结构设计适当补正量。特别是中分面背面，一般要下沉5 mm钻孔。密切注意孔中心的尺寸，要防止组芯后或者收缩率不当，引起中心偏差过大，至少在管口处要给予一定补正。凸台，一部分起定位作用，一部分

如图2 (a) 所示，在分型面部位有5对热节（对称共10处）需要被补缩；如图2 (b) 所示，铸件最大分体模数为8.969 cm，最小分体模数为0.611 cm。

2.2 生产方法的选择

根据铸件大小，翻箱生产多，也可根据实际情况选择地坑造型。不管哪种生产方法，都要充分考虑起模困难地方，必要时要做成活块或砂芯，有时候，砂芯难以下芯，还需要在下芯子时候平推后填砂，方可固定。造型材料方面，选择碱性酚醛树脂砂造型制芯，配合使用锆英粉涂料、圆角处放置铬矿砂，可保证铸件表面质量。

需要钻孔，钻孔时，要给一定的补正量，防止中心不准。壁厚整体加厚3 mm，防止涂料、热处理、打磨等引起的壁厚尺寸不足。适当的补正量设计可为后期加工调整留有余量。

多箱分型时，要考虑分型负数。要适当考虑上述机械加工余量和补正量，会引起生产成本的增加。

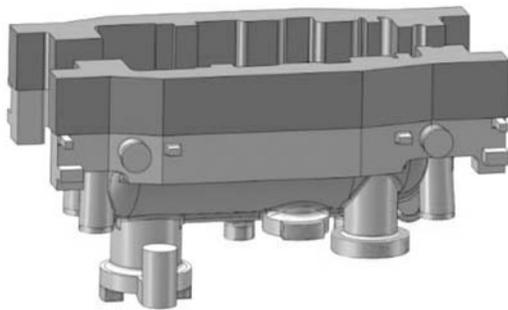
2.4 砂芯设计

由于内腔的砂芯轮廓尺寸大，要考虑芯骨刚度，防止砂芯变形引起铸件尺寸偏差。内腔砂芯的芯头部位强度不够，可以采用扩大芯头的方法，向上增高200~300 mm。砂芯若排气不畅，易出现侵入性气孔，从而导致铸件报废。可采用的方法是出气绳沿着内腔轮廓均匀放置，最后在芯头处汇集一起，排出砂型外。

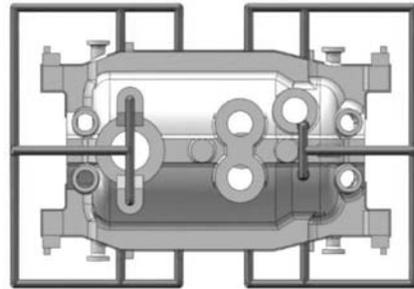
2.5 防止缺陷方面的设计

在中分面设置30 mm厚集渣槽，防止砂眼气孔。设置30 mm厚防裂筋板，防止裂纹。适当加大圆角，减少裂纹。注意加大圆角后不得影响铸件使用。暗冒口设

置出气孔，砂芯设置出气。外观质量主要通过型砂的强度、粒度、厚度、紧实度和耐火度等，配合有机粘结剂和锆英粉涂料，部分过热区域用铬铁矿砂，浇注前吹热风，且注意浇注温度、速度和时间等控制措施保证。



(a) 整体冒口



(b) 侧进浇注系统

图3 原始铸造工艺的整体冒口与侧进浇注系统

Fig. 3 The original casting process: integral risers and gating system inflowed from side

是由于冒口太大，造成了出品率仅有42%。侧进的上层浇注系统，可能造成液面飞溅、冲砂芯等不利因素。

3.2 原始工艺弊端

传统的缸体铸造工艺，受生产条件和工人素质的影响，往往采用大的加工余量、大的补缩通道和较多的冷铁，虽然浇注的铸件，质量达到了汽轮机的使用要求，但是它造成了工艺出品率低下及材料的大量浪费。另外整体冒口在收缩时，应力较大，加剧了变形和裂纹的产生。浇注系统上层浇道从两侧的法兰进入型腔，可能造成高温液态钢液有一定的紊流现象，对产品的内部质量造成不利影响。首件生产后，探伤发现中分面有一些气孔缺陷。

随着我国经济的日益高速发展，对环保要求日趋激烈，“碳排放”和“碳中和”概念的提出，要求缸体铸造工艺要满足质量要求的同时，尽可能地节省材料，减少碳排放。

4 工艺优化设计

4.1 优化的内容

中分面背面是容易出现热裂纹的地方。一般为了形成致密组织，铸钢件生产会强调顺序凝固，但是过大的温度梯度会产生较大的收缩应力，极易造成裂纹缺陷。在能保证充分补缩的基础上，适当的温度梯度尤为重要。另外，应力大小与铸造圆角（ R 角）成反比关系， R 角的增大能减轻应力集中现象。由图4可知，增大 R 角可以明显地减缓温度梯度和改善应力集中现象。在增大 R 角的同时，增加防裂筋，可以有效减小热裂纹的产生。缸体铸造工艺防裂筋布置见图5。



图4 缸体铸件圆角处优化

Fig. 4 Filleted corner optimization of the cylinder block casting

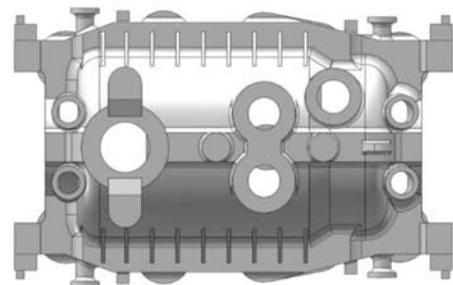


图5 缸体铸造工艺防裂筋布置

Fig. 5 Anti-crack rib arrangement in cylinder block casting process

3 原始铸造工艺

3.1 原始铸造工艺

原始工艺采用了整体发热板冒口+侧进的浇注系统（图3），这种设计能最大程度满足铸件补缩需要，但

中分面补缩，选择单个冒口，以提高工艺出品率。产品较大时，一般砂芯内中间部位要再放置一排冒口。尽量选用常用的发热圆形冒口，少拼接。应尽量少用工艺补贴，以保证出品率。工艺补贴是为实现铸件的有效补缩而人为增加的结构，清砂后需要去除，以保持原样铸件结构。必要时，为防止缩松，还要放置随形冷铁。当冒口或者工艺补贴下部难以修出时，要制作样板。优化后的缸体补缩系统和浇注系统见图6。

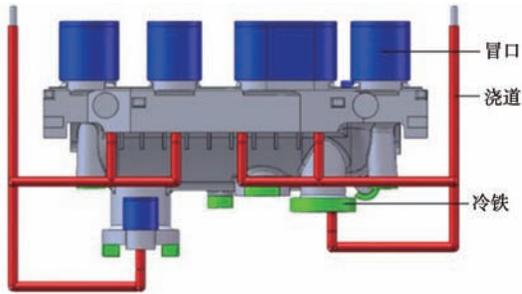
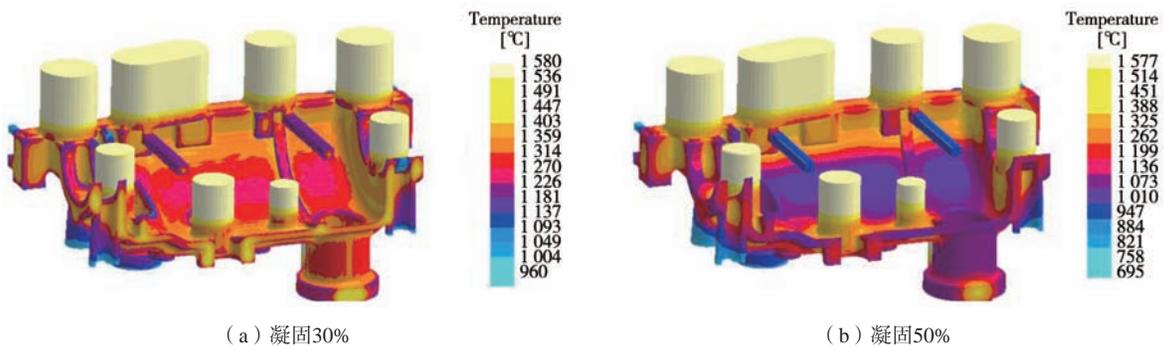


图6 优化后的缸体铸件补缩系统和浇注系统

Fig. 6 The optimized feeding and gating systems of cylinder body casting

4.2 工艺优化后铸件凝固过程数值模拟

本次工艺，采用三种（明冒口、暗冒口和侧冒口）冒口设计，配合随形冷铁，保证顺序凝固，以满足内部补缩的需求（图7）。管口处，采用随形明冷铁，进一步加快末端的凝固速度，保证RT探伤。圆角处设置防裂筋，避免了因为壁厚悬殊大而产生应力，导致的热裂纹。热裂纹是铸件生产中危害性最大的铸造缺陷，也是铸造工艺设计中需要考虑的重要内容。一旦出现裂纹缺陷，在使用的过程中，裂纹会产生应力集中导致扩展，形成较大的裂纹，造成产品失效，有很大的质量风险。



(a) 凝固30%

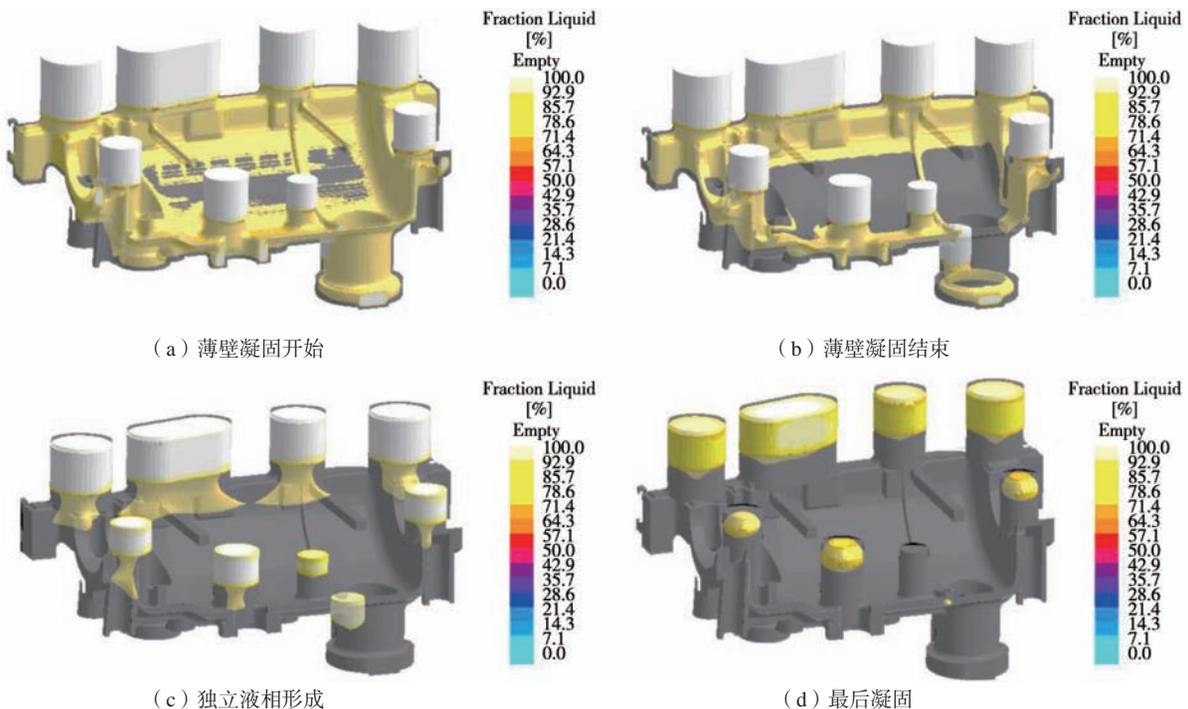
(b) 凝固50%

图7 缸体铸件凝固过程温度场分布

Fig. 7 Temperature field of the cylinder block casting during solidification process

经过重新设计的凝固过程见图8。通过凝固过程数值模拟发现，缸体铸件先凝固的部位是薄壁处的腔

体，最后凝固的部位是厚大的中分面。发热冒口能对中分面进行有效的补缩，防止了中分面产生缩孔、缩



(a) 薄壁凝固开始

(b) 薄壁凝固结束

(c) 独立液相形成

(d) 最后凝固

图8 凝固过程

Fig. 8 Solidification process

松等铸造缺陷。

4.3 工艺优化后铸件充型过程数值模拟

浇注系统对温度场分布影响较大，对铸造缺陷缩松、裂纹也有较大影响，要注意内浇口位置与各浇口流量大小，尽量减少进入型腔时冲型、冲芯、较严重的湍流。

设置原则推荐为低温浇注、快速充型、双层浇道、多包浇注。另外，LF+VOD精炼钢液，有力保证了N、H、O气体控制和减少夹杂物的需求。底返开放式双层浇注系统设计，保证了优质钢液平稳快速的充型要求。双包合浇方案，全速浇注，保证钢液尽快完成充型（图9）。

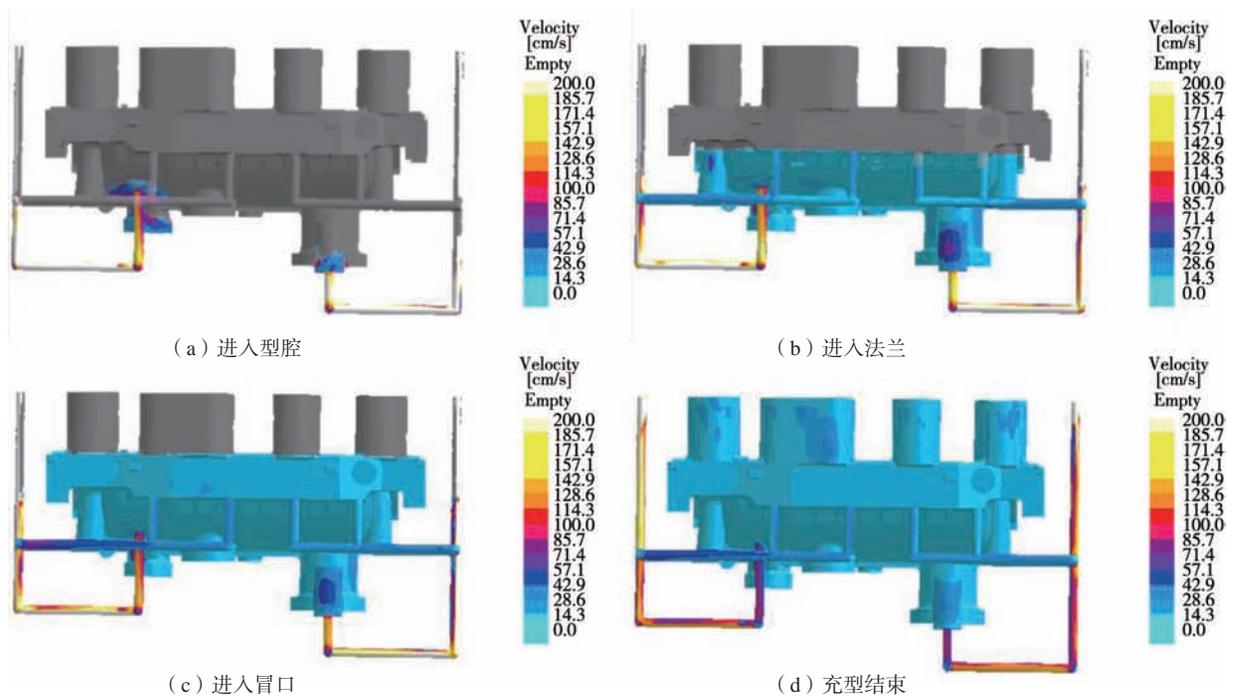


图9 缸体铸件的充型过程

Fig. 9 The mold filling process of the cylinder block casting

5 缸体材料制备

5.1 材料的发展

随着汽轮机发电功率的增加，工作温度从300~620℃不等，工作压力从1.2~31 MPa不等，材料的要求也随之发生变化（表3）。提高汽轮机主蒸汽温度

（汽轮机进口，靠近自动主汽门前的蒸汽温度）是提高汽轮机效率的主要技术措施，而提高汽轮机主蒸汽温度的关键是高温零部件新材料的开发与应用。其中汽轮机主蒸汽温度每提高10℃，热耗约下降0.25%~0.3%。

表3 汽轮机缸体的工况与材料的关系

Tab. 3 The relationship between the working condition of the turbine cylinder block and the material

分类	中压	高压	超高压	亚临界	超临界/超超临界	超超临界
工况	≤400℃	≤500℃	≤540℃	≤570℃	≤600℃	≤620℃
材料	ZG25	ZG20CrMo	ZG20CrMoV	ZG15Cr2Mo1/ZG15Cr1Mo1V	ZG12Cr9Mo1VNbN (9Cr钢)	ZG12Cr9Mo1Co1NiVNbNB (CB2)

为了提高金属结构抗蠕变性能，一方面通过研究材料元素对抗蠕变性能的影响^[11]。众多学者对9Cr钢的热处理工艺已做了大量研究^[12-14]，但对于CB2耐热钢的

热处理工艺研究相对缺乏。对于多元合金CB2耐热钢，工程中必须通过热处理来改善其组织，进而提高其性能，从而满足工程应用的需要^[15]。

5.2 冶炼过程

本试验先采用三相电弧炉碱性氧化法初炼钢液，将成分控制在标准范围的下限。再使用钢包进行吹氩精炼，微调化学成分，最终将化学成分控制在中限，防止化学成分超标。选用低硫磷的氯化铬铁，合理规

划元素的配比，防止生成有害相，最终冶炼成功了ZG12Cr9Mo1VNbN材料。

5.3 热处理工艺

本试验采用的热处理参数如表4所示。

表4 热处理参数
Tab. 4 Heat treatment parameters

类型	起始温度/℃	升温速度/(℃·h ⁻¹)	保温温度/℃	保温时间/h	冷却方式
正火	150	50	1 050 ± 10	15	鼓风冷至90~120 ℃，空冷
回火	150	70	740 ± 10	15	炉冷至90~120 ℃，空冷

6 生产验证

6.1 工艺验证

经过实际生产验证，产品内部质量满足GB/T 7233.1—2009《铸钢件 超声检测 第1部分：一般用途铸钢件》中二级要求（图10），中分面等关键部位达到一级要求；铸件尺寸公差满足GB/T 6414—2017中CT13级要求，壁厚CT14级要求；外观平整、无大面积钢包砂，经过抛丸后，达到JB/T 4058—2017《汽轮机清洁度》中洁2要求。产品验收已经合格，各项指标完全达到了客户的标准。



图10 缸体实物
Fig. 10 The body of the cylinder

6.2 高温拉伸试验

高温拉伸试验通常是指温度恒定在1 100 ℃以下，规定加载速率，受载方式为单项的拉伸试验，主要检测材料的抗开裂性能。由试验数据可以得出结论（表

5），随着温度的升高，抗拉强度和屈服强度呈现下降趋势。在450~600 ℃范围内，屈服强度下降速率为1.76 MPa/℃，抗拉强度下降速率为1.91 MPa/℃。

表5 高温拉伸性能
Tab. 5 Tensile properties at high temperature

试样编号	温度/℃	标准屈服/MPa	实测屈服/MPa	实测抗拉/MPa
1#	450	≥365	597	633
2#	500	≥340	523	524
3#	550	≥305	416	479
4#	600	≥250	333	346

6.3 高温持久试验

高温持久试验是测定材料在某一温度下受恒定载荷作用时，在规定的持续时间内不引起断裂的最大应力的一种材料力学性能试验，主要检测材料的抗变形能力。通过对比5#、6#数据可得（表6），相同应力+不同温度条件下，温度越高持久时间越短。通过对比6#、7#数据可得，相同温度+不同应力条件下，应力越大持久时间越短。通过5#、6#、7#、8#四个试验对比，不同应力+不同的温度条件下，受具体试验数值影响，持久时间无明显规律。

6.4 冲击性能试验以及 FATT₅₀ 测定

常温下，材料的冲击性能很好，分别为124 J、115 J、120 J。冲击样的宏观断面见图11。

表6 高温持久性能
Tab. 6 High temperature endurance performance

试样编号	温度/℃	标准应力/(N·mm ⁻²)	试验直径/mm	转化拉力/N	验收标准h	试验结果h	备注
5#	550	210	5.01	4 138	≥90	109	自然断裂
6#	600	210	5.01	4 138	≥90	98	自然断裂
7#	600	140	5.00	2 748	≥90	167	人为拉断
8#	650	90	5.05	1 802	≥90	102	自然断裂



图11 冲击样的宏观断面

Fig. 11 Macroscopic section of impact sample

$FATT_{50}$ 为断面形貌转变温度，材料随着温度的降低，断口中脆性形貌（如解理/准解理）的面积占比会上升，达到50%时的温度记为 $FATT_{50}$ 。试验了不同温度下的冲击断口的脆性形貌面积占比，结果见表7。从表中数据可得， $FATT_{50}$ 断面形貌转变温度为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

表7 9Cr钢在不同温度下的脆性形貌面积占比
Tab. 7 The percentage of brittleness morphology of 9Cr steel at different temperatures

温度/ $^{\circ}\text{C}$	脆性形貌面积占比/%
-50	90
-30	85
-20	60
-15	50
-12	40

6.5 显微组织分析

经过4%硝酸酒精腐蚀后，打磨抛光，进行金相分析，结果见图12。显微组织显示为回火马氏体组织，分

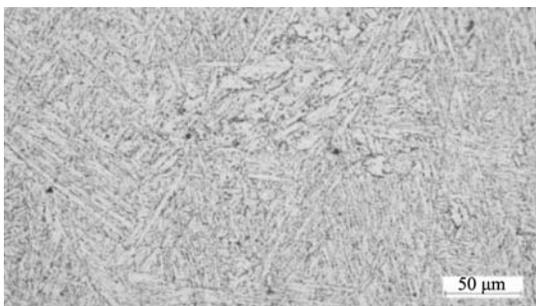


图12 ZG12Cr9Mo1VNbN试样的金相组织

Fig. 12 Metallographic organization of ZG12Cr9Mo1VNbN

布较均匀。

6.6 断口形貌分析

通过扫描电镜SEM分别对拉伸断口和冲击断口进行了形貌观察。由图13的断口形貌分析可以发现，断口处存在大量韧窝，说明断裂类型为韧性。

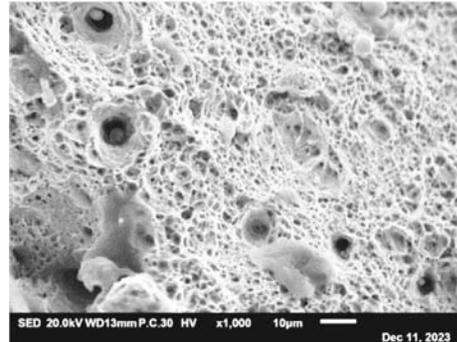


图13 断口形貌分析

Fig. 13 Fracture morphology analysis

7 结论

(1) 通过MAGMA数值模拟软件分析，汽轮机缸体铸件可采用发热冒口，配合使用随形外冷铁的方法，能有效减少缩松、缩孔缺陷。底返开放式双层浇注系统，能满足缸体平稳快速的充型要求。并进一步采用增大圆角和增加防裂筋的方法，避免铸件凝固时形成的热裂纹。

(2) 采用碱性电弧炉氧化法和钢包精炼的方法，获取ZG12Cr9Mo1VNbN材料。采用鼓风机风冷和 $740\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温回火的方法，得到了回火马氏体组织，性能得到极大提升。

(3) 研究了在 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下，高温材料的高温拉伸强度和高温持久强度都有所下降，且下降的幅度较大，可由此分析材料的适宜工作温度。

(4) 通过冲击试验，得到高温材料的 $FATT_{50}$ 断面形貌转变温度为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。并通过SEM断口形貌观察，发现存在大量韧窝，失效类型为韧性断裂。

参考文献:

- [1] 史进渊, 阳虹, 张宏涛, 等. 我国汽轮机产品的新进展与发展方向 [J]. 动力工程学报, 2021, 41 (7): 542-550.
- [2] 蔡小燕, 李胤祺, 杨红霞. 国内垃圾焚烧发电汽轮机技术发展现状 [J]. 热力透平, 2021, 50 (2): 79-82.
- [3] 张伟明, 张远刚. 船舶动力装置发展研究 [J]. 内燃机与配件, 2017 (17): 39-40.
- [4] 王福艳. 中国汽轮机技术发展简析 [J]. 山东工业技术, 2017 (5): 264.
- [5] KOCER C, ABE T, SOON A. The Z-phase in 9%-12% Cr ferritic steels: a phase stability analysis [J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 505 (1): 1-5.

- [6] DANIELSEN H K, HALD J. A thermodynamic model of the Z-phase Cr (V, Nb) N [J]. Calphad, 2007, 31 (4) : 505-514.
- [7] HALD J. Microstructure and long-term creep properties of 9%-12% Cr steels [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2008, 85: 30-37.
- [8] MARUYAMA K, SAWADA K, KOEKE K. Strengthening mechanisms of creep resistant tempered martensitic steel [J]. ISIJ International, 2001, 41 (6) : 641-653.
- [9] KIM I S, LEE S M, KIM J Y, et al. Co addition effect on the precipitation behavior of laves phase In Fe-10Cr ferritic alloy [C]//Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing, 2007, Jeju Island (KR) .
- [10] ALBERT S K, KONDO M, TABUCHI M, et al. Improving the creep properties of 9Cr-3W-3Co-NbV steels and their weld joints by the addition of boron [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005, 36 (2) : 333-343.
- [11] YUKIO Takahashi. Study on creep-fatigue evaluation procedures for high-chromium steels-part I: test results and life prediction base on measured stress relaxation [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2008 (85) : 406-422.
- [12] CHEN Guohong, LIU Junjian, WANG Jiaqing. Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of T91 heat resistant steel [J]. Hot Working Process, 2010, 39 (14) : 131-134.
- [13] 王然, 贺明贤. 热处理对T91钢金相组织及显微硬度的影响 [J]. 金属热处理, 2000 (11) : 6-8.
- [14] SAMANTARAY D, MANDAL S, BHADURI AK. Optimization of hot working parameters for thermo-mechanical processing of modified 9Cr-Mo steel employing dynamic material model [J]. Material Science and Engineering A, 2011, 528 (15) : 5024-5211.
- [15] 周平, 杨雪, 孙兰, 等. 回火温度对ZG12Cr9Mo1Co1NiVNbNB耐热钢组织及性能的影响 [J]. 四川大学学报 (工程科报), 2016, 48 (S1) : 198-202.

Casting Process and Material Preparation of 600 MW Supercritical Steam Turbine Cylinder Block

ZHU Xiao-long¹, WANG Wen-yan¹, XIE Jing-pei¹, WANG Zheng-hui², DIAO Xiao-gang³, ZHANG Fei-yang¹

(1. Department of Materials; Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan, China; 2. Luoyang Luobei Heavy Industry Machinery Co., Ltd., Luoyang 471100, Henan, China; 3. CITIC Heavy Industry Luoyang Heavy Iron Industry Co., Ltd., Luoyang 471632, Henan, China)

Abstract:

Because of the complex structure of steam turbine cylinder block, the casting defects such as shrinkage porosity and crack are easily formed by using of traditional casting process. In this research, the feeding and gating systems are optimized by MAGMA numerical simulation software, and a process scheme with reliable quality and high casting yield is obtained. 9Cr steel is the most commonly used heat-resistant material for 600 MW supercritical steam turbine cylinders. The uniform and stable microstructure is obtained by air cooling of blower, and the tensile properties at different high temperatures are studied, and the change rules of tensile properties with increasing temperature were obtained. In addition, the $FATT_{50}$ is -15 °C got by impact test. The microstructure was analyzed by SEM, and it was found that the microstructure was uniform and the instability of mechanical properties was avoided

Key words:

steam turbine; cylinder block; casting; high temperature performance; ZG12Cr9Mo1VNbN; heat resistant steel